高学年学生実験 (後期)

イオントラップ

～ イオントラップの製作 ～

担当： 中野 健一 (柴田研究室、本館 158 号室)
TA： 小野 竜太 (柴田研究室、本館 158 号室)

参考資料

- 物理学実験第二 黄色冊子
  - レポート課題はこれを参照 (実験手順は最新でない)
- 実験手順書 … **web page**
  - 実験手順
- イオントラップ電極組立説明書 … **web page**
  - パーツからの組立手順
- 装置取扱説明書 … 印刷物 **(or web page)**
  - 装置の使用方法
- 石倉徹也氏 修士論文 … 印刷物
  - 様々な計算や測定の方法の詳細な説明 (特に比電荷)
- イオンのレーザー冷却とその応用 … 印刷物)
  - イオントラップの応用例等 (レポート執筆用)

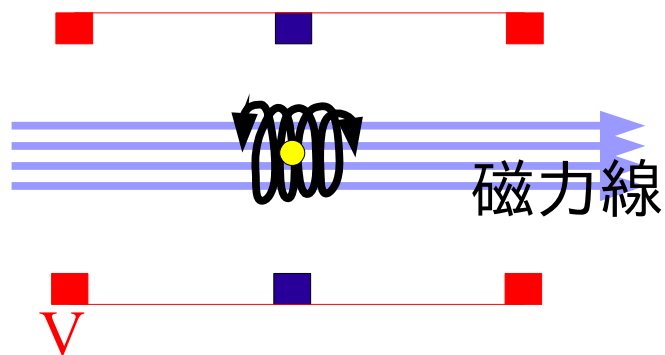
日程

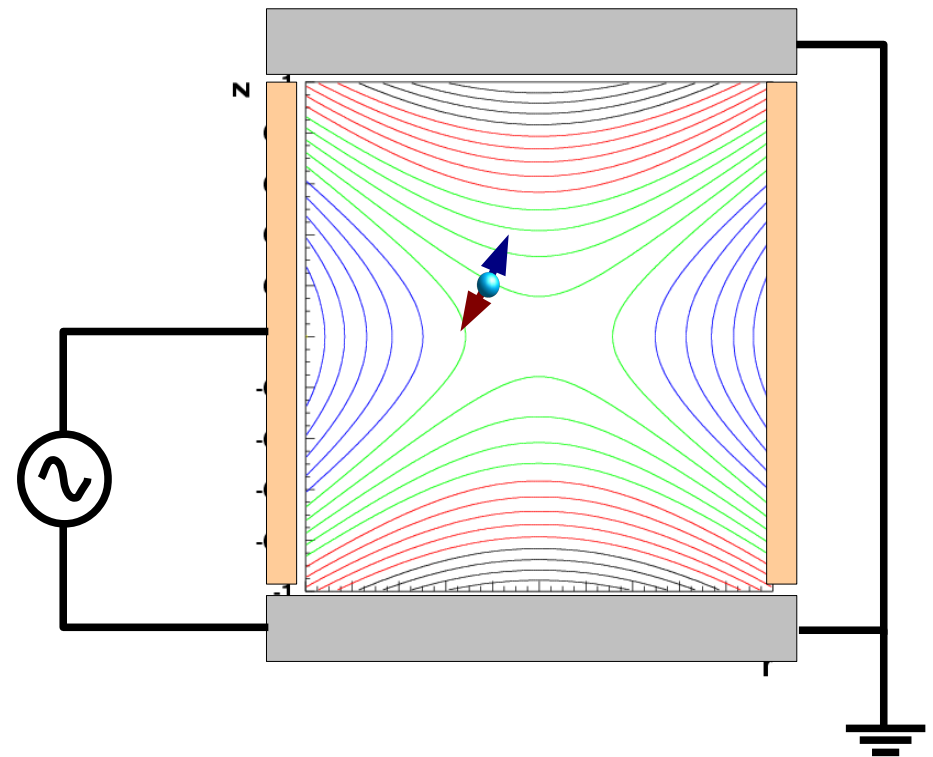
- 実験 1 日目、2 日目
  - 実験説明
  - イオントラップ装置の組み立て
  - トラップテスト
- 実験 3 日目
  - 粒子の比電荷測定
- 実験 4 日目
  - ディスカッション
  - 追加実験

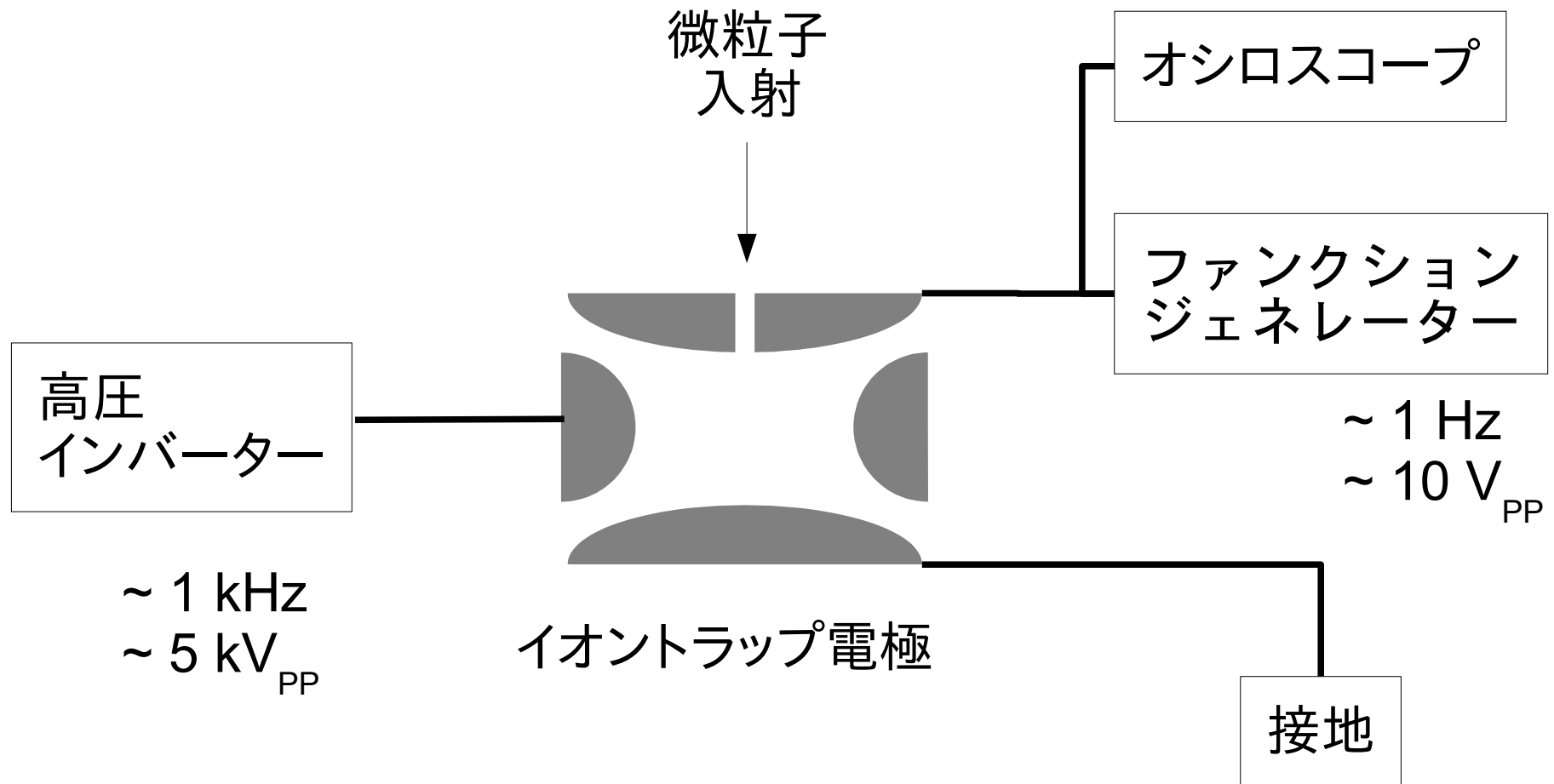
実験でつかうトラップ装置

- 特徴
  - 空気中でイオンをトラップ
  - 安定に長時間粒子を捕獲
  - 目視できる程度の粒子
    - 数 **10μm** の粒子
  - 簡単に組み立て可能
  - 卒業研究のテーマ
    - 小林秀幸、平成5年度
    - 和田雄一郎、平成8年度
    - 城野潤平、平成12年度
    - 石倉徹也、平成 **19** 年度

イオントラップ

ペニングトラップ

磁場と電場で
イオンをトラップ

ポールトラップ

交流電場だけで
イオンをトラップ

イオントラップ実験装置

第1日目:トラップ装置組み立て

- 実験器具の確認
  - トラップ装置、高圧発振器、直流電源、ファンクションジェネレーター
  - エアブラシ、直流高圧電源
  - それぞれの配線確認
- 装置組み立て(電気的構造を理解)
  - 実験手順書に沿って、トラップ装置を組み立てる
  - 部品を組み立てる毎に、テスターで導電・絶縁を確認
- 高圧印加テスト
    - 発振器単体のテスト: オシロで測定
    - トラップ装置に印加: オシロでリング電圧の測定

第1、2日目:トラップテスト

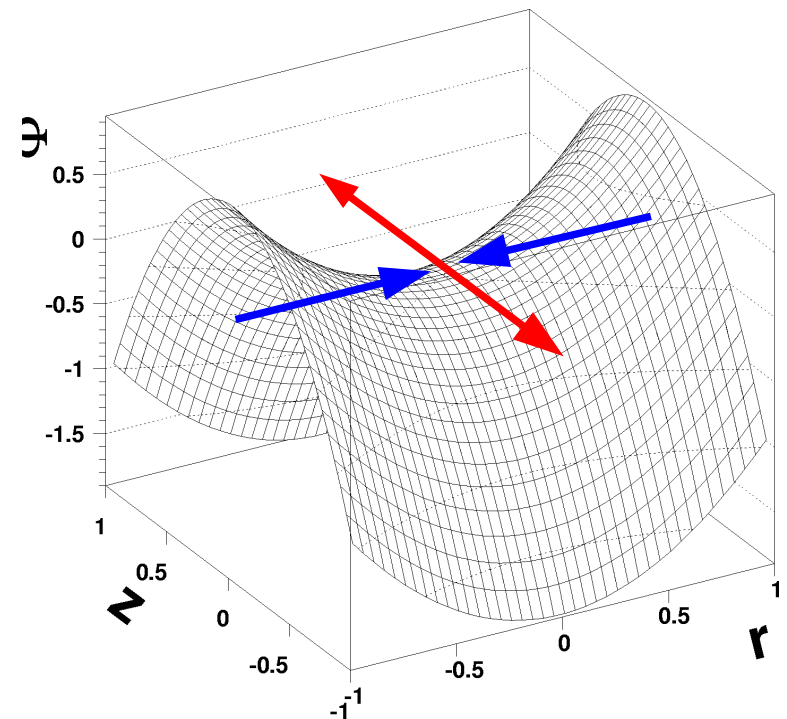
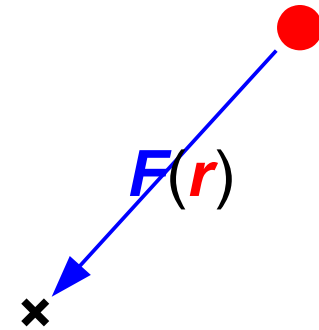
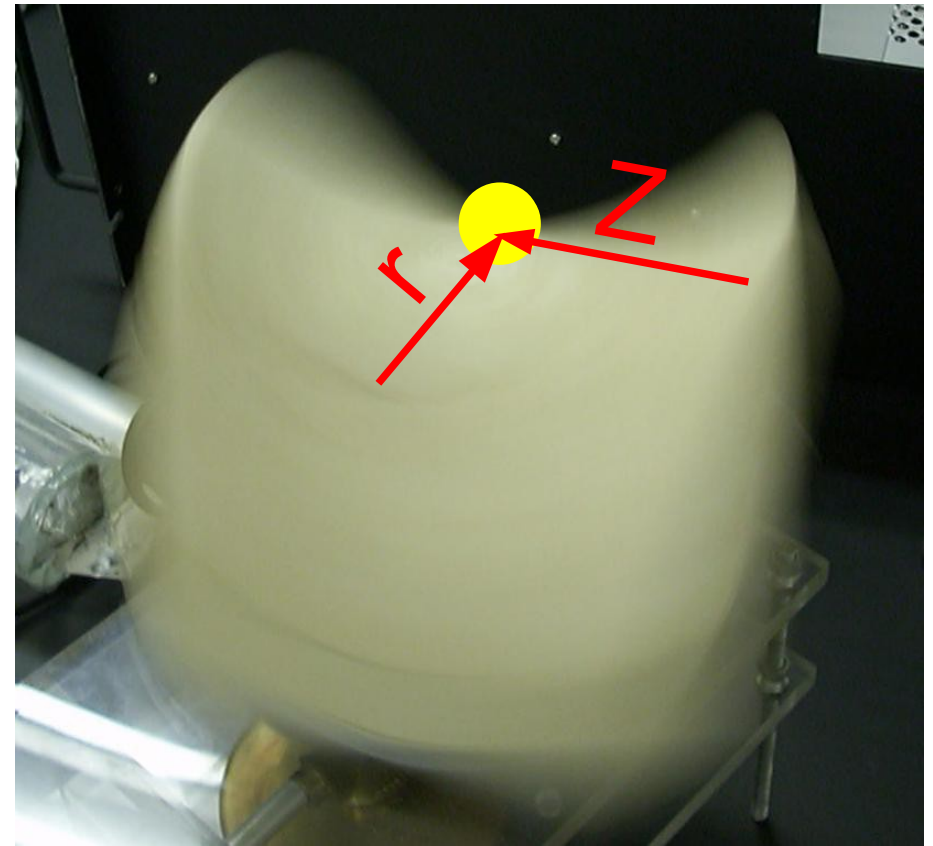
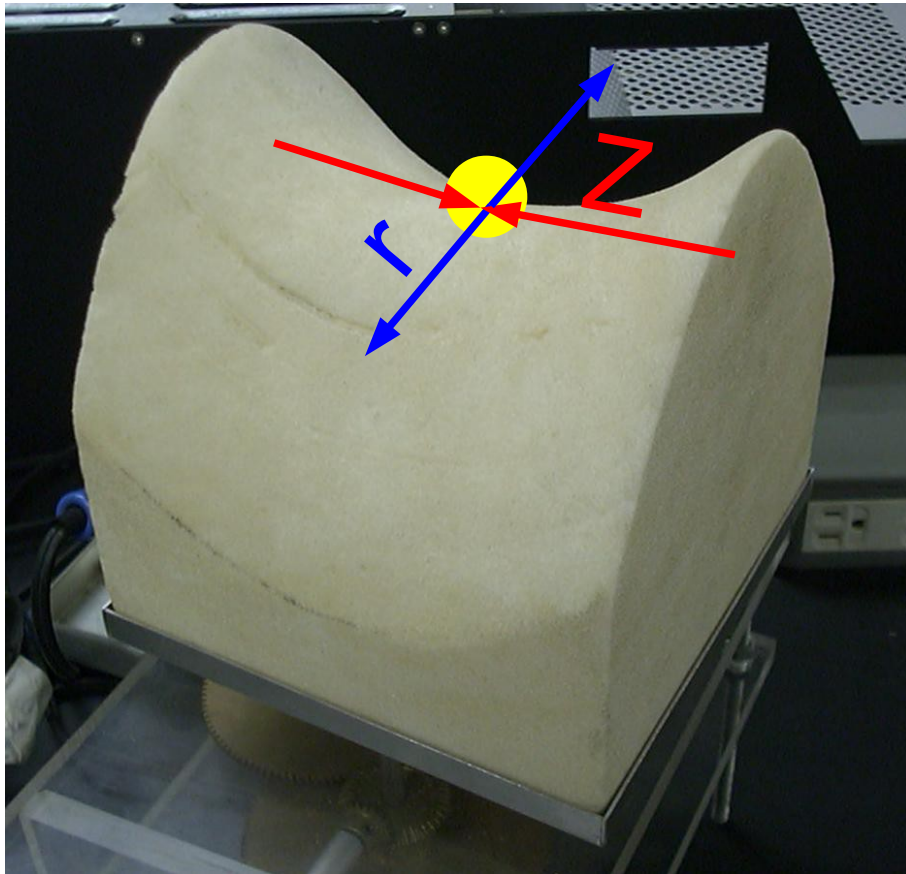
- トラップ粒子発生装置
  - 鉄粉の準備
  - 直流高電圧電源との接続
  - 電圧印加テスト
- トラップテスト
  - トラップ装置: 直流電源 **(9V)**
  - 鉄粉への印加: **2.5kV**
  - 超高輝度白色 **LED** を使って照明
  - ビデオカメラでモニタに写して観察 **(** 課題 **1)**

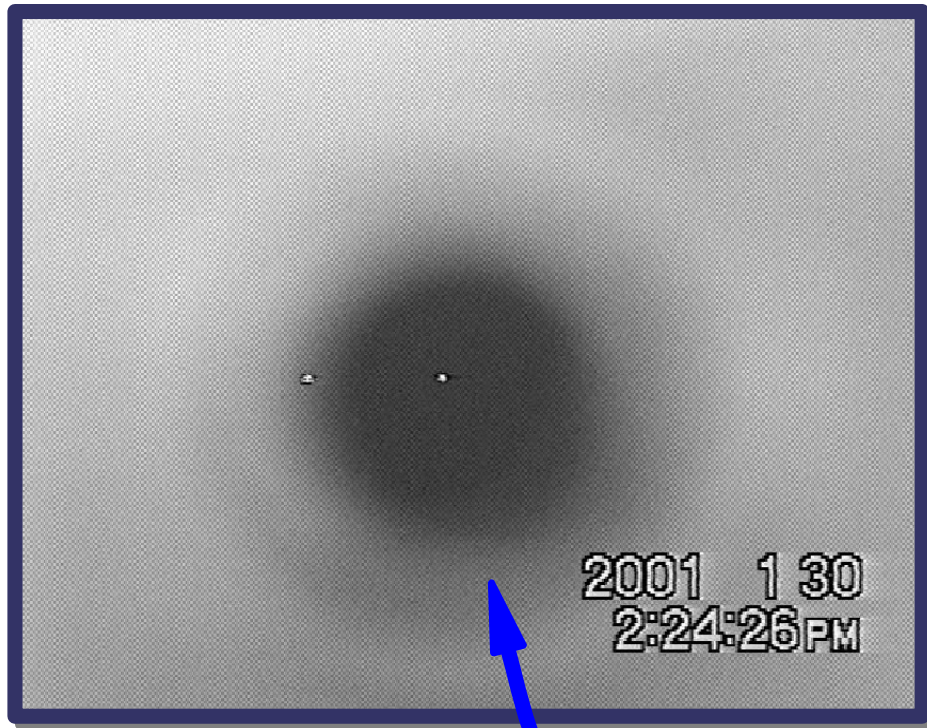
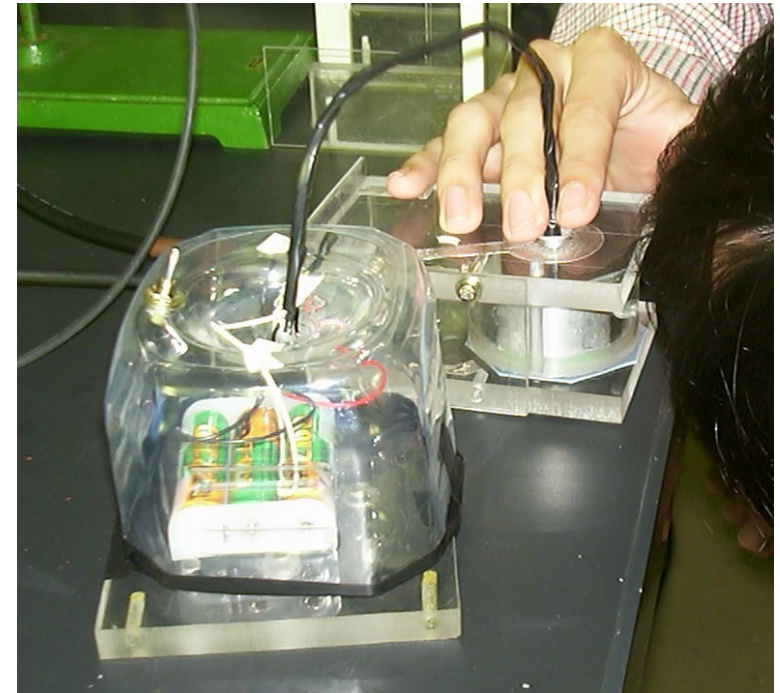
ポールトラップ

中心点のまわりで荷電粒子を捕獲するために (中心力)

鞍型ポテンシャル $(\Phi_0 > 0)$

z 方向　斥力

r 方向　閉じ込め

ポールトラップ(模型)

鞍型ポテンシャル —回転すると→ 双曲型ポテンシャル

ビデオカメラで観測

トラップされた粒子の様子
可能な限り拡大して撮影

ビデオカメラを使って観察

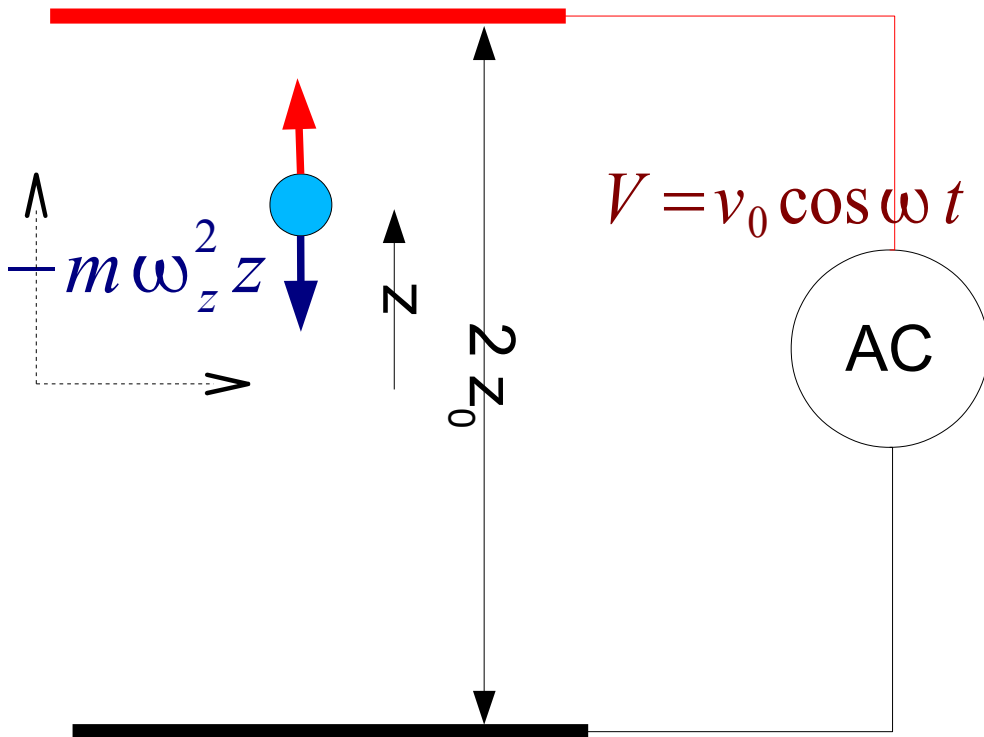
実験2日目:テスト実験

- 鉄微粒子の捕獲
  - 鉄微粒子: **+2.5kV**
  - リング電極: **5kVPP**
  - キャップ電極間: **~1Hz, ~10VPP**, 正弦波
- トラップ粒子の外場によるコントロール
  - キャップ電極間
    - **0.1 ～ 10Hz, 0.1 ～ 10VPP**, 正弦波、矩形波等
    - **Offset** 電圧 **: –5 ～ 5V**
  - リング電極
    - リング電極電圧: **1kVPP** ～ 上限値
    - キャップ電極間: **~1Hz, ~10VPP**, 正弦波

実験3日目:比電荷測定

- トラップ電場内での粒子運動の観測
  - トラップされた粒子に外部から電場をかける
    - 電場によって粒子が運動する
    - 運動方程式?
  - 振動外部電場のある場合、粒子の運動は比電荷、大きさに依存する
    - 外部電場の条件を変化させて、粒子運動を観察
    - 粒子運動の振幅測定
    - 比電荷導出

外部電場によるイオンの運動

イオントラップによる見掛の力

$$-m\omega_z^2 z$$

外部電場 V による力

$$\sim e\cdot\frac{V}{2z_0} = \frac{ev_0}{2z_0}\cos\omega t$$

空気抵抗による力

$$\propto -\frac{dz}{dt}$$

比電荷測定の原理

トラップ粒子の運動方程式:

$$m\frac{d^{2}z}{dt^{2}} = -m\omega_z^2 z - k\frac{dz}{dt} + \Gamma\left(\frac{e v_0}{2 z_0}\right)\cos\omega t$$

トラップ力
(電極・粒子の比電荷から決定)

空気抵抗
k: 粒子の大きさに関係

外部からの振動電場
v_0 を変化

一般解:

$$z(t) = C_1 e^{\alpha t} + C_2 e^{\beta t} + A\sin(\omega t + \phi)$$

$$A = \frac{1}{\sqrt{\left(\omega_z^2 - \omega^2\right)^2 + \left(k\omega/m\right)^2}}\frac{e}{m}\frac{\Gamma v_0}{2 z_0}$$

$$A \propto v_0$$

異なる ω で dA/dω を測定
⇒ k と 比電荷を導出

どうやって計算するか？

両辺を v_0 で割って

$$\frac{A}{v_0}=\frac{1}{\sqrt{\left(\omega_z^2-\omega^2\right)^2+\left(k\,\omega/m\right)^2}}\frac{e}{m}\frac{\Gamma}{2z_0}$$

各 ω で振幅比 A/v_0 は一定:

それぞれの周波数で A/v_0 を求める。

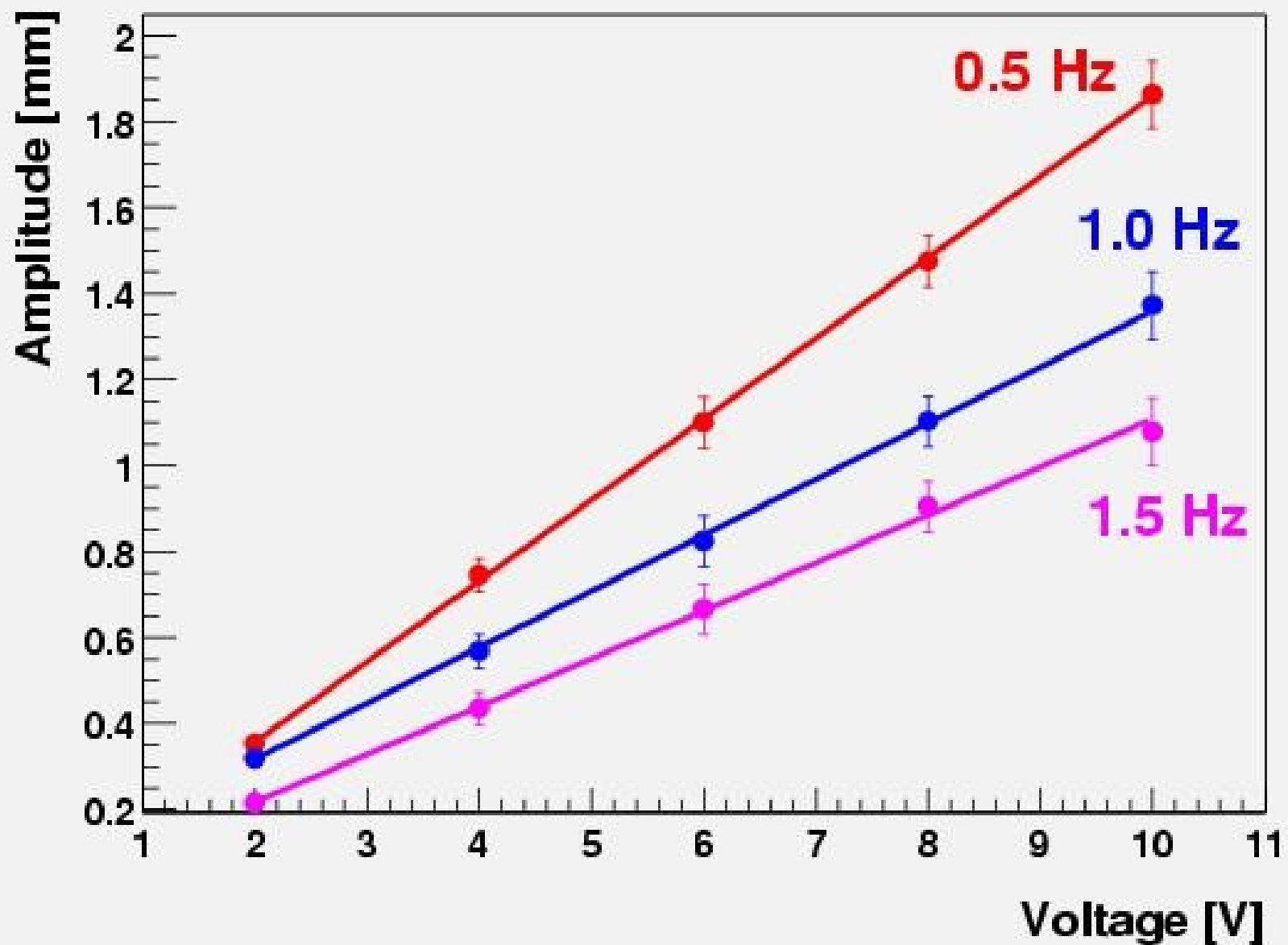
v_0 を変更し振幅 A を測定 ⇒ 平均の A/v_0 を求める。

２乗して式変型して

$$4D_1^2\left(\frac{e}{m}\right)^4-\left(4D_1\,\omega^2+D_2\left(\frac{v_0}{A}\right)^2\right)\left(\frac{e}{m}\right)^2+\omega^2\left\{\omega^2+\left(\frac{k}{m}\right)^2\right\}=0$$

異る ω で測定を行うと、、、

粒子の振動振幅測定

Amplitude [mm]
2
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
Voltage [V]
0.5 Hz
1.0 Hz
1.5 Hz

比電荷測定の原理 ②

未知の変数はｋとe/m の2つあるが、、、、

$$A=\frac{1}{\sqrt{(\omega_z^2-\omega^2)^2+(k\,\omega/m)^2}}\frac{e}{m}\frac{\Gamma v_0}{2z_0}$$

$0<q_z<0.92$

$\Omega\sim 10^3(Hz)$

$$\omega_z^2=\frac{q_z^2}{2}\cdot\left(\frac{\Omega}{2}\right)^2=\left(\frac{e}{m}\right)^2\cdot\frac{2V_0^2}{r_0^4\Omega^2}$$

$\omega_z \gg \omega$

$$A\sim\frac{1}{\omega_z^2}\frac{e}{m}\frac{\Gamma v_0}{2z_0}$$

$$\frac{e}{m}\sim\frac{r_0^4\Omega^2}{2V_0^2}\cdot\frac{\Gamma}{2z_0}\cdot\frac{v_0}{A}$$

未知変数は e/m のみ!!

近似条件の評価

近似条件の評価をしてみよう:

$\omega_z \gg \omega$?

粒子半径は実際はどの程度か？

空気中を落下する粒子の速度 (v ~ 1cm/s) から見積もる。

他には何がコントロールできるか？

比電荷を正確に測定するためには、振幅を正確に測定する。
振幅はおおきいほうが、測定精度が向上する!!

実験4日目：追加実験

- 比電荷測定のつづき
- 追加実験
  - マニュアルを参考に興味をもったテーマについて実験する。

テキスト訂正

- **P. 55** 、トラップ電極の説明
  - （誤）再近接部の内径が **11mm**
  - （正）再近接部の**内半径**が **11mm**

レポート

提出先:
本館1階 58号室

- レポートの構成
  - イオントラップについて
    - 原理、応用例等
  - 実験に使った装置について
    - 構造、電極電圧、トラップ粒子等
    - トラップ条件の考察 (課題1)
  - 帯電した食塩水のトラップ
    - トラップ粒子の観察
    - 比電荷測定 (課題2)
  - 追加実験
    - 行なった実験の結果について (課題3)